

ゲーミングPCを用いた偏波計測システム

水野 いづみ

〈東アジア天文台 / East Asia Observatory,
660 N. A'ohōkū Place University Park Hilo, Hawaii 96720 U.S.A.〉
e-mail: i.mizuno@eaobservatory.org



CCS分子のゼーマン効果を計測するため、わずか7万円のゲーミングPCを用いて開発した偏波分光計Polarisを野辺山45m鏡に導入し偏波計測システムを立ち上げました。Polarisは61 Hzの高い周波数分解能で、全ストークスパラメーターを計測できます。本稿では、Polarisの偏波計測性能への要求仕様とそれを実現するための設計および開発、さらに性能評価の手法と過程を、立ち上げエピソードとともに紹介します。

1. はじめに

星は、分子雲コアが重力という収縮力に対して、磁場、乱流という反発力を受けながらゆっくり収縮し形成されます。この3つの力のうち磁場の情報が欠けていたため、その計測は星形成を理解するためにとっても重要でした。

分子雲コアの磁場はCCS分子輝線のゼーマン効果により計測できる見通しがあり、野辺山45m鏡(NRO45m)にゼーマン分裂計測システムを搭載するプロジェクトを国立天文台の中村文隆氏が立ち上げました。ゼーマン分裂は円偏波成分に現れます。予想された磁場強度100 μG程度ではわずか64 Hzのゼーマン分裂が円偏波成分に生じます。そこでこの計測が可能なバックエンド(分光計, AD変換器)とフロントエンド, Z45 [1]をNRO45mに設置しました。プロジェクトの意義, フロントエンドのコミッションングについて天文月報前号の中村文隆氏の記事に詳しく述べられています。本稿では主に私に関わったバックエンドとそのコミッションングを中心に紹介します。

2. 偏波の計測方法

2.1 全偏波成分の計測

電磁波の振動面の偏りを偏波といいます。偏波はStokesパラメータ I, Q, U, V を使って表します。 I が全電波強度, Q, U が直線偏波強度, V が円偏波強度です。全Stokesパラメータは、直交2偏波に分けて受信した信号の自己相関と相互相関から求められます。電波は偏波もしくは円偏波受信します。電波を直交直線2偏波(水直線平偏波, 垂直偏波)受信したときの受信信号を X, Y で表すと、Stokesパラメータを式1のように計算できます。

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ C & -S & S & -C \\ S & C & C & -S \\ 0 & -i & i & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \langle XX^* \rangle \\ \langle G_X G_X^* \rangle \\ \langle XY^* \rangle \\ \langle G_X G_Y^* \rangle \\ \langle YX^* \rangle \\ \langle G_Y G_X^* \rangle \\ \langle YY^* \rangle \\ \langle G_Y G_Y^* \rangle \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで G は利得, $C = \cos 2\psi$, $S = \sin 2\psi$ で、 ψ は視野回転角です。

受信する電波の振動を右旋偏波と左旋偏波の直交する2つの円偏波成分 R, L に分離した場合、 $E = \exp(i2\psi)$ とおいて式2のようにStokesパラメー

タを計算できます。

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & iE & iE^* & 0 \\ 0 & E & -E^* & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{RR^*}{G_R G_R^*} \\ \frac{RL^*}{LR^*} \\ \frac{G_R G_L^*}{LR^*} \\ \frac{G_L G_R^*}{LL^*} \\ \frac{LL^*}{G_L G_L^*} \end{pmatrix} \quad (2)$$

2.2 円偏波成分の計測

円偏波成分, V をどのように計測すると精度が高くなるか考えます。受信成分のほとんどは無偏波で関連しません。参考までに目標天体を観測したときの受信成分のイメージを図1に示します。そのため、相互相関から V を求めることで精度が高くなることが期待できます。直線偏波受信すると、円偏波成分 V は相互相関の虚数部 $\text{Im} \langle XY^* \rangle$ で表されます(式1)。それに対して円偏波受信すると、円偏波成分は自己相関成分の差 $v = \left\langle \frac{RR^*}{G_R G_R^*} \right\rangle - \left\langle \frac{LL^*}{G_L G_L^*} \right\rangle$ によって表されます(式2)。2つの直交成分は利得が異なる独立のアナログ信号系を経た後に分光処理するため、円偏波受信では、利得の変動の不一致が偽の V として現れます。以上の理由からプロジェクトでは両直線偏波受信を採用し、相互相関成分から円偏波成分 V を求めることにしました。天文月報の前号の亀野誠二氏の記事で直交直線偏波受信での偏波較正方法について詳しく書かれています。

3. ソフトウェア偏波分光計

電波天文学における分光とは、時系列に変化する信号から周波数に対するパワーの大きさを求める(パワースペクトルに変換する)ことをいいます。まず、放射電場は受信機によって電圧信号に変換されます。その後サンプラー(AD変換器)によってアナログ信号からデジタル信号に変換し、分光計で相関とフーリエ変換を行うことでパワースペクトルを得ます。分光計は、主に専用の集積回路を用いるデジタルハードウェア分光計が使われていました。そのうち全偏波を計測する性能があるデジタルハードウェア偏波分光計に IRAM30 m 鏡の VESPA などがあります。ハードウェア偏波分光計は仕様を変えるためには専用ハードウェアを作り変える必要があり柔軟性はありません。それに加え汎用性がないためコストが高くメンテナンスが困難です。部品には全て寿命があり経年劣化します。劣化が進んだころには故障した部品の製造が終了して直せないということもしばしばおきます。

我々は, PolariS をソフトウェア分光計として開発することでこのような問題を克服することにしました。ソフトウェア分光計はソフトウェアを書き換えることでスペックを変換できるので、柔軟性が高いです。専用ハードウェアは数千万円規

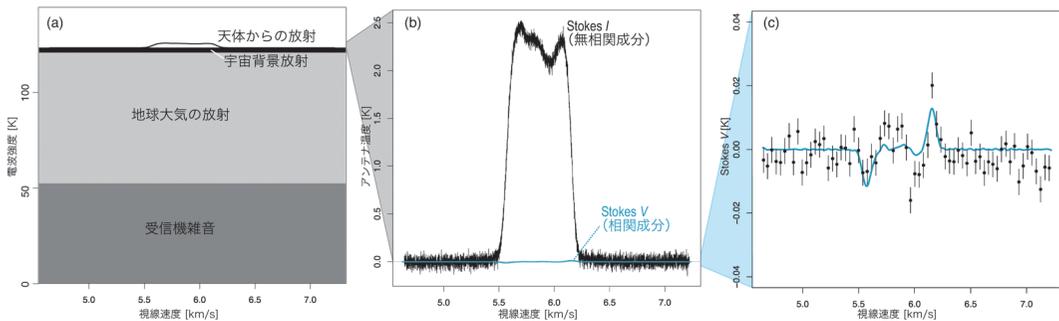


図1 受信電波に占める目的の信号成分を示す図。(a) 受信電波に占める受信機雑音と地球大気の放射および宇宙背景放射を、off点の観測により差引きます。(b) 天体の放射スペクトルの大部分は無相関のStokes I が占めます。(c) その1%以下の円偏波成分(Stokes V)を相互相関により計測します。

模なのに対して、ソフトウェア偏波分光計は市販の計算機で実装できるので、数十万円で購入することが可能です。よって、不具合がおきたときに備えスペア機を準備することもできます。そのような利点から近年ソフトウェア分光計が開発されました。Polarisの他には、Green Bank Telescopeのパルサー観測に特化したms単位という短い時間間隔で分光できるソフトウェア偏波分光計VE-GAS[2, 3]などが活躍しています。

4. Polarisのはじまり

2011年の夏に野辺山宇宙電波観測所のユーザーズミーティングでプロジェクトの初会合があった際に、当時の私の指導教員であった亀野氏に「CCS分子輝線のゼーマン効果を検出するために偏波分光計を作って欲しい」と話がありました。当時所属していた鹿児島大学では、大学院生の武田考司氏が開発したソフトウェア分光計FXSを6m電波望遠鏡で運用しており、同じ仕組みでVERA電波望遠鏡にも実装する計画が進行していたので、同様の方法で偏波分光計ができる見通しがありました。そこで、偏波分光計Polarisを開発するプロジェクトが鹿児島大学の役割として発足しました。亀野氏が、新しい偏波分光計を開発するにあたり、開発予算を2012年度公募「国立天文台共同開発研究」に応募しました。予算を上限の200万円程度に収めるには、専用ハードウェアの開発は無理ですので、FXSのように汎用計算機によるソフトウェア分光が考えられました。必要な計算速度を見積ります。NRO45mに既存のバックエンドを考慮して4MHzの帯域×4信号系統の分光を考えます。64Hzのゼーマン分裂を計測するためにそれより細かい61Hzでの分光します。このためには、65536点FFT（高速フーリエ変換）をリアルタイム（8ミリ秒以内）に処理し、さらに分光に必要な乗算と積算を行うには、6Gflopsの演算性能が必要です[4]。長時間安定して観測を継続するには、3倍程度のマージンを

見込んで20Gflops程度は確保しておきたいです。FXSでは複数の汎用コンピューターを高速ネットワークで接続し計算をしています。このような計算機クラスターだとすぐに予算上限を超えてしまいます。そこで、当時流行しつつあった、GPU（Graphic Processing Unit）を使うことになりました。グラフィックゲームのユーザー（ゲーマー）の需要に応じて、当時でもTflopsレベルの演算性能をもつGPUが数万円という安価で市販されていました。さらにGPUメーカーのNVIDIAはCUDAというGPU演算ライブラリやNVCCというコンパイラを提供しており、FFTなどの分光に必要な演算がGPUで実装できます。そこで申請書には、GPUを搭載したゲーミングPCを分光計本体とし、A/D（アナログ-デジタル）変換器など物品に野辺山までの旅費を加えた200万円を予算を計上し、ほぼ満額で採択していただきました。

5. Polarisの仕組みと仕様

PolarisはVLBI用に開発された高性能なA/D変換器、K5/VSSP32 [5]とGPUを組み込んだパソコン（Polaris PC）から構成されます（図2）。直交2偏波信号をリアルタイムにFFT演算し、パワースペクトルとクロスパワースペクトルを出力します。K5/VSSP32へはNTK7631A（周波数変換器）から4MHz帯域のアナログ信号を入力します。最大で4IF (X_0, X_1, Y_0, Y_1) 入力できます。それぞれの信号は8bitで量子化します（99%以上の量子化効率を得られます）。デジタル信号はPolaris PCのCPUで受け取り、GPUへ出力します。GPUでFFTしたのち自己相関、相互相関、積分し得られた自己相関と相互相関スペクトルをCPUへ出力しbit分布とともにハードディスクへ書き込みます。周波数分解能61Hzで、分光点数は65536点（4MHz帯域）です。bit分布はシステム雑音の演算に使われます（本稿6.2.2）。仕様を表1にまとめました。

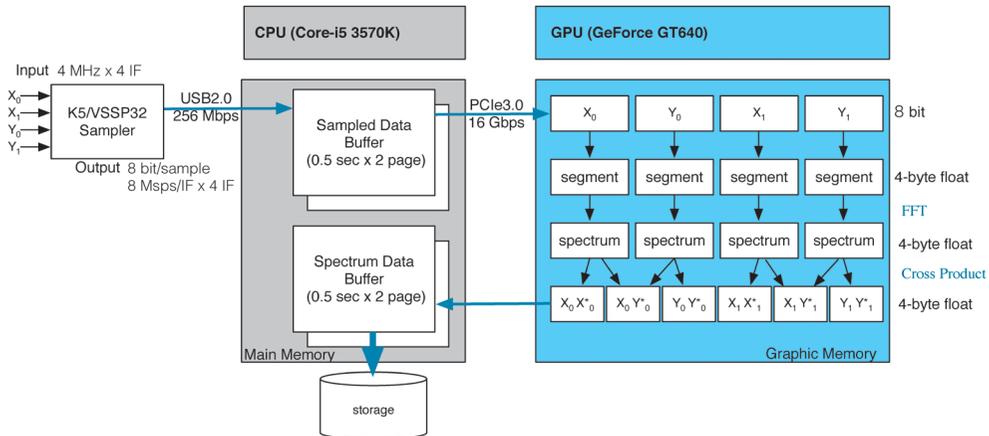


図2 PolariSの構成要素と信号処理の概念図. 4系統(2偏波×2 IF)のIF信号をK5/VSSP32でデジタル化し, USBでPolariS PCに入力します. 主記憶上で0.5秒分の信号を並び替えてグラフィックメモリに転送し, GPUにて4バイト浮動小数点化, セグメント化, FFT, 相関処理を行い, スペクトルデータを主記憶に返します. 1秒間積分したスペクトルをファイルに保存します.

表1 PolariSの仕様.

IF数	4 (X_0, X_1, Y_0, Y_1)
周波数幅	4 MHz/IF
量子化レベル	8 bit/sample
チャンネル数	65536 ch/IF
周波数分解能	61 Hz
出力	相互相関, 自己相関, ビット分布
時間分解能	1秒

PolariS PCのOSはLinux (Ubuntu 12.04 LST)で, パソコンにはIntel Core-i5 CPU, 4-GBメモリ, NVIDIA GT640 GPUを搭載しています. PolariS PCにかかった費用はわずか7万円です. コントロールと信号処理はGCC (GNU Compiler Collection)とNVCC (NVIDIA CUDA Compiler)でコーディングしています. FFT演算にはcuFFTライブラリを使っています. 全体のコードは亀野氏が, GPUの演算コードは, 物理科学科2年生のカリキュラムである「サイエンスクラブ」の課題として, 加納周氏が書きました. PolariSの分光処理ソフトウェアは, GitHubリポジトリ (<https://github.com/kamenoseiji/PolariS>)で公開しています.

6. 性能試験

PolariSの性能評価は鹿児島大学の4年の黒尾信氏の卒業論文で行われたPolariSの性能試験を参考にしながら行いました. PolariSの性能評価(周波数分解関数, 線形性, 相互相関関数スペクトルの計測性能)とPolariSを含めたバックエンド全体の安定性の結果を紹介します. さらに詳しい性能試験の情報は[4]にまとめています.

6.1 周波数分解関数

分光計が計測したスペクトルは, 本来のスペクトルに周波数分解関数を畳み込んだものです. 周波数分解関数は分光計の仕様によって決まります. 仕様から予測した周波数分解関数と一致することを以下のようにして確認しました. PolariSは平坦な窓関数を使っているため, 周波数分解関数はSinc関数の2乗, $R(v) = \left[\frac{\sin(\pi v / \Delta v)}{\pi v / \Delta v} \right]^2$ になると予測できます. ここで $\Delta v = 4 \text{ MHz} / 65536 = 61.03515625 \text{ Hz}$ はPolariSの分光チャンネル幅です. 周波数分解関数の半値幅の理論値は $0.886\Delta v = 54.07 \text{ Hz}$ です. これを計測するために, シグナルジェネレーター(SG)からの単色波を周波数方向に掃引しPolariSで計測しました. 結果を図3に示します. 理論値

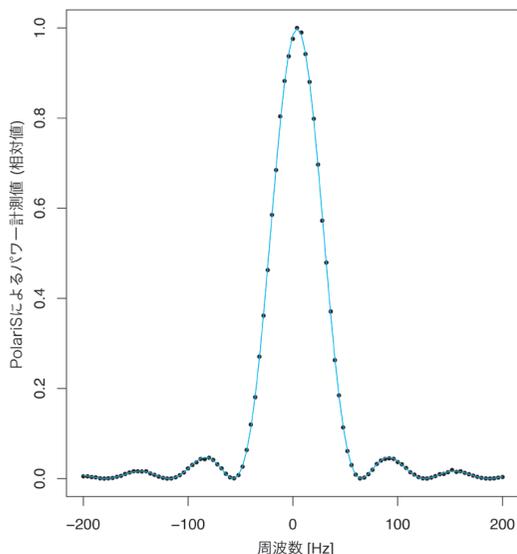


図3 周波数分解関数の計測結果。●は計測点で青線は Sinc^2 関数をフィットしたものの。

と一致する $\text{FWHM} = 54.02 \pm 0.06$ Hz の Sinc^2 関数であることが分かりました。窓関数を工夫することで、周波数分解関数のサイドローブを下げるすることができます。この処理は分光後に行うことができます。

6.2 線形性の計測

正しく天体からの信号を計測するためには、装置に入力した信号と分光計が計測した信号強度が比例する、線形性が保たれる範囲で信号を入力する必要があります。PolariSに単色波と白色ノイズを入力してそれぞれに関して線形性が保たれる範囲を計測します。

6.2.1 単色波を入れたときの線形性

輝線を観測したときの線形性の範囲を確認します。Z45から受信した空からの連続波にSGで単色波を注入し、単色波のパワーを変化しながらスペクトルを計測します。パワーの変化を入力値と計測値で比較し線形性の範囲を確認します。その結果33dB以上の範囲で線形性が確保されました。これは天体観測に十分な精度です。

6.2.2 連続波を入力したときの線形性

受信した天体からの信号を物理的な単位、アンテナ温度に変換するためにシステム雑音温度の計測が必要です。システム雑音温度は空と電波吸収体を観測したときの受信電力から算出します。分光周波数帯域内でシステム雑音温度は一樣とみなせるので帯域内を積分したトータルパワー（帯域内の電力）を使います。トータルパワーの計測は、受信した信号を分配し、パワーメーターで計測する方法が一般的ですが、AD変換器のbit分布を用いて、分光をする信号から直接計測することもできます[6]。bit分布の量子化の諧調によって線形性の範囲と精度が異なりますが、実際に分光する信号のパワーを計測するので、より精確なシステム雑音を計測できる可能性があります。K5/VSSP32では8bitの高諧調で量子化をします。そこで、bit分布から計測したパワーの線形性の範囲と精度を確認しました。計測には白色雑音を出力するノイズソースからの電力を入力し、減衰器（アテネーター）で入力レベルを変化し、bit分布とパワーメーターで計測したトータルパワーを比較しました。そして、誤差1%以内で13dB以上にわたって線形性が確保できていることが分かりました。Z45で観測したとき空と電波吸収体を観測したときのパワーの比は8dB程度なので13dBはシステム雑音温度計測に十分な精度です。

6.3 相互相関スペクトルの計測性能

直線偏波受信で円偏波を計測するには相互相関成分の計測が必要です。人工偏波源を使って相互相関計測の性能の確認を行いました。長方形の導波管とSGで生成したほぼ100%直線偏波している22GHz帯の電波をH22受信機（両円偏波受信機）に入力し、直交2円偏波間で相互相関を計測しました。100%直線偏波していた場合、全ての成分が相関します。計測した結果ほぼ100%、 $97.6 \pm 0.2\%$ の成分が相関することを確認しました。100%からのずれは、偏波源の不完全性とH22受信機の交差偏波の影響があると考えられます。

6.4 安定性

天体観測するとき天体の方向 (on点) と天体を外した方向 (off点) を交互に観測します。on点とoff点の差分をとることで大気成分を補正し、off点で割ることで帯域通過特性と利得を補正します。on点とoffを観測している間にシステムの利得、帯域通過特性が十分安定でなければ白色雑音に加えてシステムの変化による系統的な誤差が加わります。そこで、効率的に雑音を下げするには、on点とoff点を観測する間にシステムが安定していることが大切です。加えて、平均的な帯域通過特性を補正した後のスペクトルがスムージングできるほど平坦で、長時間にわたり安定であれば、Smoothed Bandpass Calibration, SBC法 [7] を使って、off点の観測時間と雑音を減らすことができます。そこで、出力が一定のノイズソースの信号を入力し、システムの安定性を計測します。時間や周波数間隔による帯域通過特性の変化は、間隔毎の分散を求め、ラン分散から評価できます [4, 7]。時間方向のラン分散 (TAV) を算出したところ、システムの利得は512秒にわたって安定していることがわかりました。大気や受信

機の利得等も変動するのでon点、off点は512秒以下で取得するので、十分な安定性だといえます。帯域通過特性を比較し、帯域通過特性の形状が15時間以上にわたって安定していることがわかりました。さらに、周波数方向にアラン分散 (スペクトルアラン分散; SAV) を用いて、スペクトルの平坦性を評価しました。そして実際に、SBC法を適用して雑音が大幅に軽減することを確認しました。図4に結果を示します。スペクトルの平坦性を示すSAVは1800秒平均することで白色雑音 (チャンネル間隔の -2 乗に比例する) 成分が減少し、帯域通過特性の非平坦性が顕在化します。通常の帯域通過特性補正を適用すると、白色雑音が支配的なSAVを示します。SBCを適用すると白色雑音成分が大幅に減少し、ランダムウォークによるチャンネル間隔に比例したSAVが得られます。この結果に基づき、本観測ではSBC法を用い、on/off点のサイクルを120秒+10秒としました。亀野氏の前号の天文月報でSBCによる効率化が紹介されています。

7. 偏波計測システムの概要

PolariSをNRO45 mのVLBI観測用バックエンドに接続し、周波数安定度が高い信号処理システムを構築しました。VLBIバックエンドは水素メーザーからの信号を基準にしているため周波数安定度が高く61 Hzの周波数分解能を実現するのに必要な周波数安定度0.1 Hzを十分に達成できます。信号処理システムの全体の概略図を図5にまとめました。(1) 直径45 mのお皿で集めた電波は、ナスミス光学系を通してZ45で受信します。(2) Z45で2つの直線偏波成分に分け、信号を増幅、周波数変換します。観測中、周波数変換に使うローカル信号 (LO1) はドップラー効果などを補正するためNRO45 mの制御システムCOSMOSで制御します。(3) 信号は光伝送系 (7752TX) を通ってアンテナから観測棟へ伝わります。(4) 周波数変換器 (NTK7631B) で周

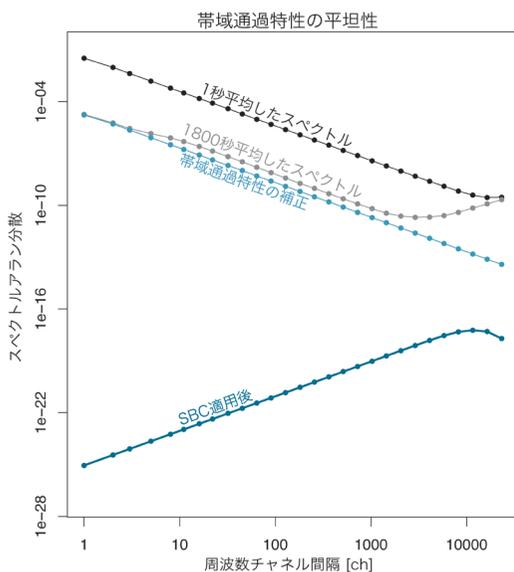


図4 SBC法による帯域通過特性の平滑化。

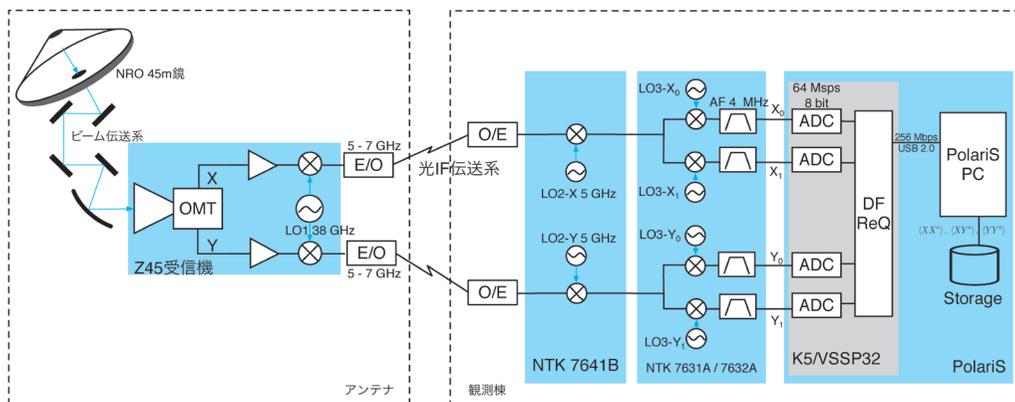


図5 新偏波計測システム全体の信号処理概略図。E/O, O/Eは電気信号と光信号の変換器、LOは局部発信機、AFはアンチエイリアスフィルタ、ADCはアナログ/デジタル変換器、DFはデジタルフィルタ、ReQは再量子化を指します。全ての信号系は水素メーザー原子時計の基準信号を参照しています。

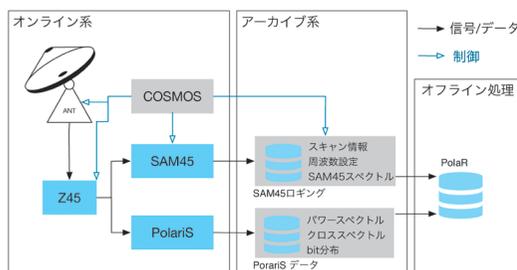


図6 制御系と信号・データの流れ。COSMOSはNRO45 mの制御システムで、アンテナ、Z45受信機、SAM45分光計を制御しSAM45ロギングを出力します。PolarisはCOSMOS制御系に組み込まれず、並行してパワースペクトル(自己相関)、クロススペクトル(相互相関)およびbit分布を出力します。これらのデータはPolaRオフライン処理系でマージされ、較正処理により偏波スペクトルを得ます。

波数を5 GHz下げます。(5) 7641Bで信号を2分配した後、周波数変換し、0-1 MHz帯域を選択します。(6) K5/VVSP32でデジタル信号に変換し、Polaris PCで自己相関、相互相関を計算し記録します。

8. 観測, 解析方法

Polarisで天体観測する際の流れを紹介します(図6)。Z45は信号をPolarisとNRO45 mの既存

の分光計SAM45に同時に出力しています。アンテナのポインティングにはSAM45のデータを使い偏波計測にはPolarisのデータを使います。アンテナの制御、Z45のLO1の制御、SAM45の制御はCOSMOSで行います。そのために、観測指示書では分光計にSAM45を指定します。PolarisはCOSMOSと連動していないので、分光を開始させるときは、独立にPolaris PCでコマンドを送ります。Polarisデータにはアンテナのスキャン情報が含まれていません。その情報は同時に取得した通称“SAM45ロギング”(SAM45が出力するスペクトルやスキャン情報をまとめたファイル)からオフラインで取得します。解析は自前のRスクリプトを使って行いました。解析プログラムは亀野氏が<https://github.com/kamenoseiji/PolaR>で公開しています。

9. Polarisの活躍

9.1 天体観測

Polarisを使った偏波天体と無偏波天体の観測結果を紹介します。偏波成分があるミラ型変光星R LeoのSiOメーザー $J=1-0$, $\nu=1$ (43.122 GHz), と $\nu=2$ (42.821 GHz)を同時受信しました。積分時間はon点, off点それぞれ41秒, 65秒です。

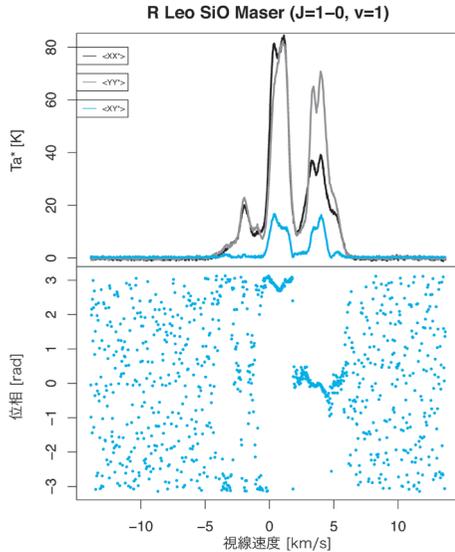


図7 R LeoのSiOメーザーをPolarisで分光したスペクトル。黒と灰色は自己相関で青は相互相関。直線偏波したスペクトルにより、 $\langle XX^* \rangle$ と $\langle YY^* \rangle$ に差が生じ、かつ $\langle XY^* \rangle$ が有意に検出されています。また、 $\langle XY^* \rangle$ の位相が速度成分により異なることから偏波角が異なることが分かります。

図7に $\nu=1$ の自己相関スペクトルと相互相関スペクトルを示します。2つの直交偏波の自己相関成分スペクトルにはアンテナ温度が異なる成分があります。そして、有意な相互相関スペクトルを検出しています。これは偏波成分が存在することを表しています。位相は円偏波と直線偏波の大きさ、向きによって変化します。0と π に集中していることから、相互相関成分は直線偏波が大半を占めることが分かります。よって、異なる速度成分における π の位相差は直線偏波の偏波角の差異によっておこっています。無偏波天体はTMC-1 CCS $J_N=4_3-3_2$, (45.379 GHz) のD領域のb7クランプ[8]をon点off点それぞれ252秒, 275秒観測しました。TMC-1の偏波成分はわずか数mKと理論予想されており、短時間の観測では偏波成分が雑音に埋もれるので、無偏波天体とみなせませす。自己相関と相互相関スペクトルを図8に示しました。TMC-1の観測結果は無偏波天体の特徴

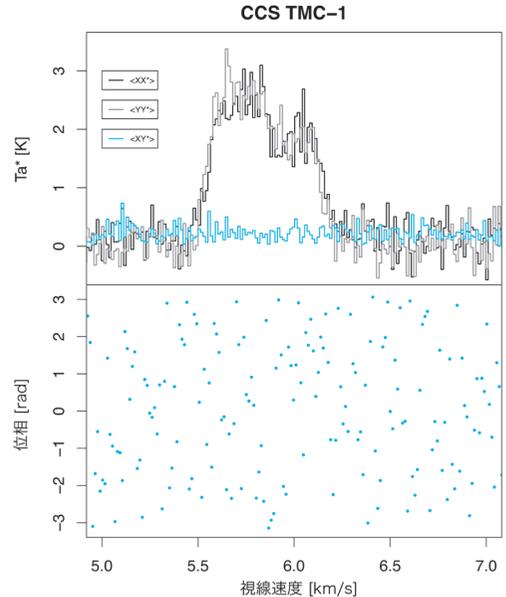


図8 TMC-1のCCS輝線をPolarisで分光したスペクトル。配色は図7と同じ。有意な偏波成分は検出されていません。

を示しました。2つ直交偏波の自己相関成分は誤差の範囲で一致しています。そして、有意な相互相関のパワースペクトルは検出されていません。相互相関スペクトルの位相が π から $-\pi$ の範囲までランダムに存在していることも相互相関成分がないことを表しています。自己相関スペクトルのピークのアンテナ温度は 2.47 ± 0.04 Kで、鈴木ら[9]によってNRO45 mで他の受信機, H40を使って計測された $T_a^* = 2.23 \pm 0.09$ Kと10%の精度で一致しました。この誤差はアンテナ温度を計測するときに使ったチョッパーホイール法での近似と光学系の違いにより生まれたと考えられます。

9.2 ローカル信号の精度調査

Polarisは天体観測だけでなく、受信システムのローカル信号の安定性調査にも活躍しました。Polarisを用いてSG, NTK7641Aから出力される複数のローカル信号の安定性を計測しました。Polarisにローカル信号を直接接続し、相互相関の位相を計測しました。そして、位相分散が0.01rad以下の安定度が高い信号をシステムに採用しました。

10. コミッショニングよもやま話

私は指導教員だった亀野氏がチリへ赴任すると同時に野辺山で研究をはじめました。野辺山で PolariS のコミッショニングをはじめた当時は野辺山のバックエンドの知識がありませんでした。高価であろう装置を目の前にし、大丈夫かと不安になったのを覚えています。しかしいろいろ試行錯誤していく中で装置を理解していきました。

私は既存のバックエンドに PolariS を接続するんだから、試験は PolariS だけでいいと考えていましたが、その考えは甘かったです。初め、PolariS で天体観測したとき、アンテナ温度が正しく計測できませんでした。問題を調査していく中で既存のバックエンドの線形性に問題を見つけました。当初使用していた周波数変換器と光伝送系で線形性が確保できていないシステムを見つけました。周波数変換器は代わりがあり、ケーブルのつなぎかえだけでなんとかなりましたが、光伝送系は改修が必要になりました。そこで野辺山観測所、VLBI グループの方に教えていただきながら、当時野辺山で研究していた谷口琴美氏と改修作業を行いました。光ケーブルの取り扱いは初めてでビクビクしながら行ったのを覚えています。

Z45 のコミッショニングでも多くの作業に関わらせていただきました。受信機、立ち上げのプロの方々の作業や考え方はとても勉強になりました。そしてコミッショニングが終わったころには、装置がずっと身近なものになっていました。また、装置の特性を知ることで、観測データをより理解することができました。冬の寒い野辺山で試行錯誤しながらチームみんなで協力して立ち上げ作業をしたことは良い思い出です。私はちょうど今新しい受信機のコミッショニングをハワイにある James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) でしているところです。こちらでも予測してなかった問題がおこり一筋縄ではいきません。野辺山で得られた経験と知識が役に立っています。

謝 辞

PolariS やバックエンドのコミッショニング・運用には VLBI グループ、野辺山観測所、Z45 チームに協力していただきました。亀野氏には地球の裏側から粘り強く支えていただきました。PolariS の開発は国立天文台共同開発研究 (2012 年度) の助成を、観測と解析には科学研究費補助金基盤研究 (A) 24244017 の助成を受けました。心から感謝いたします。

参考文献

- [1] Nakamura, F., et al., 2015, PASJ, 67, 117
- [2] Barsdell, B. R., et al., 2012, MNRAS, 422, 379
- [3] Magro, A., et al., 2011, MNRAS, 417, 2642
- [4] Mizuno, I., et al., 2014, J. Astron. Instrum. 3, 1450010
- [5] Kondo, T., et al., 2006, IVS General Meeting Proceedings, 195
- [6] Nakatake, A., et al., 2010, PASJ, 62, 1361
- [7] Yamaki, H., et al., 2012, PASJ, 64, 118
- [8] Peng, R., et al., 1998, ApJ, 497, 842
- [9] Suzuki, H., et al., 1992, ApJ, 392, 551

Polarimetry System Using Gaming-machine at Nobeyama 45 m Telescope

Izumi MIZUNO

East Asian Observatory/James Clerk Maxwell Telescope 660 N. A'ohōkū Place University Park Hilo, Hawaii 96720 U.S.A.

Abstract: We have developed full Stokes polarimetry system using a software-based spectrometer, PolariS, which consists of a PC priced at USD \$700 to estimate magnetic fields by measuring the Zeeman splitting of the CCS molecular emission line. PolariS offers an extremely high spectral resolution of 61Hz to meet the requirements for the Zeeman splitting and precise spectroscopy. In this article I introduce specifications, design, implementation, commissioning processes, and verification results of PolariS.